干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

陕西渭北旱塬区县域耕地时空变化及其对粮食生产影响

龙小翠[1,2]， 刘 京[1,2]， 徐仲炜[1,2]， 尉 芳[1,2]

（1. 西北农林科技大学资源环境学院，陕西 杨凌 712100；
2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室，陕西 杨凌 712100）

摘 要：耕地资源是国家粮食安全的根本保障，掌握耕地数量与质量状况是合理利用区域耕地资源的前提。以位于陕西渭北旱塬东部的韩城市为研究区域，运用GIS空间分析技术，结合耕地质量评价模型、区位指数模型与重心迁移模型，分析韩城市2009—2018年耕地时空变化及其对粮食生产的影响。结果表明：(1) 2009—2018年研究区耕地空间分布变化不明显，耕地重心主要在东部平原区，耕地数量呈现西少东多、自东南向西北分散的分布格局。(2) 减少耕地主要分布于龙门镇中部、新城与西庄镇交界处、金城东部和芝川镇东部，耕地减少主要原因包括城镇化进程加快、政策实施与农业产业结构调整。(3) 10 a间各耕地质量等级面积两极分化且变化明显，高多低少，各级耕地均向更高级耕地转移，以中等地转为高等地最显著。(4) 耕地质量区域性显著，质量等级自东部黄河沿岸向西北方向逐渐降低，以黄河沿岸与平原区为主，自上而下呈低等地-高等地-中等地三段式。(5) 研究区耕地数量减少引起粮食产量下降，耕地质量分布格局影响粮食生产区位，小麦、玉米生产区与中、高质量耕地分布区重合，分布重心迁移方向一致。

关 键 词：耕地质量评价；耕地时空变化；粮食安全；渭北旱塬区
文章编号：

粮食安全成为了2021年两会会议热点，保障粮食安全的主要途径是种子和耕地。落实和强化耕地的保护工作，遏制“非农化”、防止“非粮化”现象成为各级政府与学者的重要研究课题。耕地数量和质量是保障粮食安全的基础条件，由于耕地资源利用变化，中国粮食生产格局也呈现明显的分异规律[1]。探索分析耕地质量时空变化特征及其对粮食生产的影响，对于解决区域耕地保护与非粮化问题具有重要意义。

近年来，众多学者从不同角度研究了耕地变化对粮食生产的影响[2-5]。国内外学者从耕地空间格局变化[6-9]、耕地资源动态变化监测[10-12]以及耕地质量评价[13-16]等方面展开了较深入的研究。耕地资源格局演变主要运用景观生态学方法分析耕地空间分布格局，研究内容主要包括耕地数量特征、景观格局和尺度效应等，即耕地斑块形状、大小、密集程度及动态变化在空间上的体现，通过与粮食生产格局变化做比较，探索两者空间联系[17-19]。耕地资源动态变化监测主要运用国土调查或统计年鉴的数据资料分析耕地数量的变化，同时利用时间序列、三点滑动平均、灰色预测等预测模型测算耕地未来变化态势及粮食生产潜力[20-22]。耕地质量评价主要是从耕地土壤肥力（自然属性）变化开展定量研究的，耕地自然属性变化在较长时间内发挥作用，具体量化耕地质量等级的面积变化、区位变化与重心迁移对粮食生产的影响[23-25]。在已有耕地变化对粮食生产的影响研究中，国内外耕地资源差异造成了研究侧重点不同。欧美地区地广人稀、耕地资源丰富、地力保持较好且农场机械化程度高，人均耕地面积大于世界人均，侧重分析耕地质量变化对单一

收稿日期：2019-12-10； **修订日期**：2020-08-05
基金项目：国家自然科学基金项目（42071240）；轮作休耕试点区耕地质量监测与评价项目（20180913000009）资助
作者简介：龙小翠（1995-），女，硕士研究生，主要从事土地资源开发与利用等方面的研究. E-mail: 1654064716@qq.com
通讯作者：刘京（1975-），男，副教授，主要从事土地资源与空间信息技术等方面的研究. E-mail: jingliu@nwafu.edu.cn

粮食生产的影响[26-28]。中国是一个地貌复杂、人均耕地资源匮乏且空间分布上不均衡的国家，所以更多地强调耕地数量变化对粮食生产的影响[29-32]。加上，近年来由于经济快速发展及人们对生态环境质量要求的提高，耕地面积有明显下降趋势，在保障耕地面积稳定的基础上，提高耕地质量成为保障粮食安全的重要举措。因此，在经济发展迅速的地区耕地面积及质量是如何变化的？其对区域粮食生产有何影响？是评价相关部门、有关政策及措施成效的有效手段，为管理决策部门对区域资源开发利用提供理论基础。

陕西渭北旱塬区是陕北黄土高原区与关中平原区的过渡带，高原沟壑区与平原区地貌并存，人类活动频繁，生态环境脆弱。近年来由于经济发展迅速，对区域的耕地数量及质量影响显著。本文以渭北旱塬区韩城市为研究区域，区域内地貌类型主要包括山地、丘陵沟壑和平原区，属大陆性季风气候，光温条件好，年均降水量较多，集中在夏秋季节，耕地以旱地与水浇地为主，整体自然条件在渭北旱塬区具有代表性。研究韩城市耕地资源变化特征及其对粮食生产的影响，对深入认识区域耕地资源利用特征，合理利用和高效管理耕地资源，保障区域粮食安全具有非常重要的意义。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

韩城市位于陕北黄土高原与关中平原过渡带渭北旱塬区东部（图1），地处110°07′19″~110°37′24″E，35°18′50″~35°52′08″N之间，东临黄河，西接黄龙山，面积约1621 km²。韩城市是黄河沿岸核心工业能源与文化旅游城市，地势西北高东南低，属于暖温带半干旱大陆性季风气候，四季分明，气候温和，光照充足，雨量较多。年平均气温13.5 ℃，≥10 ℃积温为4626 ℃，平均年降水量559.7 mm，有利于发展农业生产。研究区花椒产业等经济作物发展迅速，粮食以小麦和玉米为主。

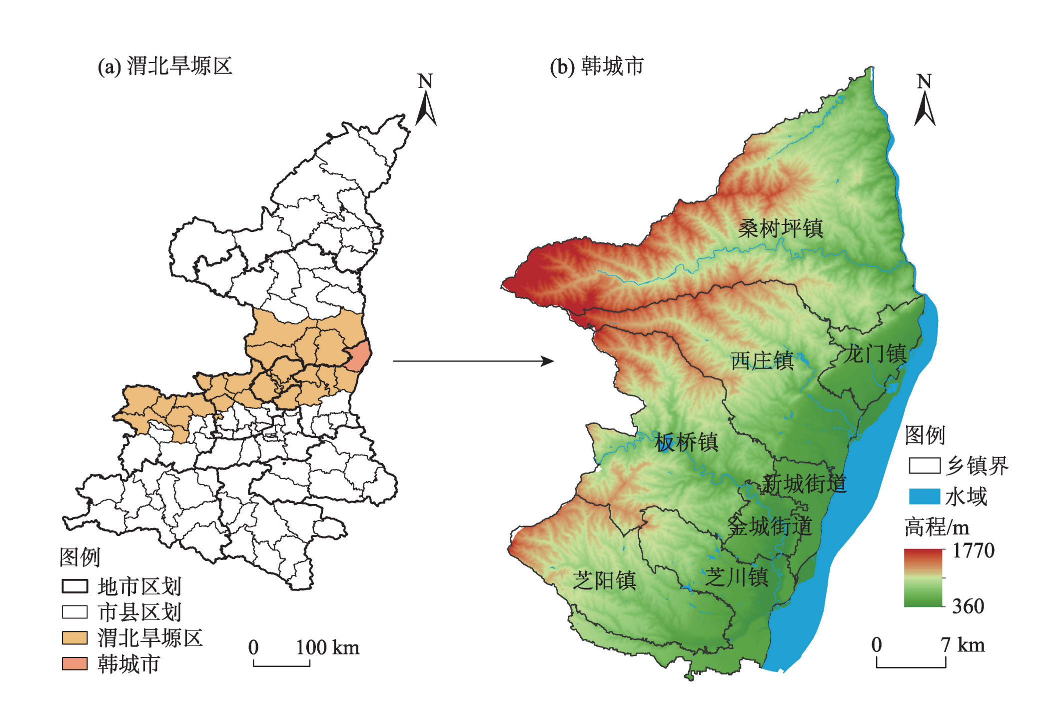
1.2　数据来源

本研究涉及到的耕地资源数据主要来自韩城市土地利用现状变更调查数据库、中国国土资源统计年报等；粮食播种面积、粮食产量与其他统计数据主要来源于《陕西省统计年鉴》与《中国县（市）社会经济统计年鉴》（2009—2018年）。

1.3　研究方法

（1）耕地质量评价模型

本文在《GB/T 33469-2016 耕地质量等级》标



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS（2019）3333号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1　韩城市概况图

Fig. 1　Overview of Hancheng City

准[33]下，根据韩城市的耕地特点，选取耕地质量评价指标体系如表1所示。

表1 耕地质量评价指标体系

Tab. 1 Cultivated land quality evaluation index system

目标层(A)	准则层(B)	指标层(C)
耕地质量	立地条件	农田林网化程度、海拔、地形部位
	土壤剖面性状	耕层质地、土壤容重、pH
	耕层理化性状	有效土层厚度、障碍因素、质地构型
	土壤养分状况	有机质、有效磷、速效钾
	土壤健康状况	生物多样性、清洁程度
	农田基础设施	灌溉能力、排水能力

选用层次分析法，计算公式：

$$W_{(i)}=\sum_{i=1,j=1}^{n}B_jC_i \tag{1}$$

$$R=\sum_{i=1}^{n}F_iW_i \tag{2}$$

式中：$W_{(i)}$ 为各评价因素的组合权重；B_j为B层中判断矩阵的特征向量，j=1, 2, …, 6；C_i为C层判断矩阵的特征向量，i=1, 2, …, 16；R为每个评价单元的最后综合指数；F_i为第i个评价因子的等级指数（评价评语）；W_i为第i个评价因子的组合权重值；n为评价因子个数。

（2）耕地质量等级区位指数模型

耕地质量等级区位指数模型[34]用来分析各等级耕地在韩城市的区域差异及聚集程度，各区域的耕地质量区位指数计算公式：

$$R_{ij}=\frac{S_{ij}}{S_j}\Bigg/\frac{\sum_{j=1}^{n}S_{ij}}{\sum_{j=1}^{n}S_j} \tag{3}$$

式中：R_{ij} 为第i等地在第j个乡镇的区位指数；S_{ij} 为第i等地在第j个乡镇的耕地面积；S_j 为第j个乡镇的耕地面积；n为韩城市市域内按乡镇划分的区域个数。

（3）分布重心迁移模型

分布重心迁移模型是指加权平均中心在研究期内沿着特定方向移动，用各评价单元的某一要素作为权数，把各评价单元的地理坐标加权平均得到单个评价单元的要素重心。此处用来分析研究区耕地质量与粮食生产区位分布重心迁移情况，分布重心计算公式为：

加权坐标：

$$x'=x\times a_i$$

$$y'=y\times a_i \tag{4}$$

平均坐标：

$$X=\frac{\sum_{i=1}^{m}x'}{\sum_{i=1}^{m}a}$$

$$Y=\frac{\sum_{i=1}^{m}y'}{\sum_{i=1}^{m}a} \tag{5}$$

式中：(x,y)为各评价单元的质心坐标；a_i 为第i个评价单元要素a的数值，用作权数；m为评价单元数；(x', y')与(X,Y)分别为重心加权坐标与平均坐标；a为耕地质量评价综合指数与粮食作物年产量。

2 结果与分析

2.1 耕地资源时空变化特征

10 a间研究区整体耕地空间分布变化不大（图2）。研究区可划分为西部山地生态区、中部丘陵产业区与东部生活平原区，耕地资源绝大部分集中分布在黄河沿岸、东部生活平原区，该区域地势平坦，海拔较低，距离水源较近，耕地呈连片带状分布；少部分分散于中部丘陵产业区，该区域坡度较缓，地势起伏不平，耕地主要沿着沟壑与水系呈不规则线状分布；西部山地生态区坡度陡、起伏大，耕地零星分布于区域内河流段，破碎度大。从各乡镇与黄河沿岸来看，黄河东部沿岸耕地数量最多且集中连片；其次是芝川镇、西庄镇、新城街道和金城街道，耕地主要分布在各镇东部；龙门镇、芝阳镇和板桥镇耕地数量相对较少，面积相差小而空间分布差异大，龙门镇耕地分布广泛，芝阳镇和板桥镇耕地分布分散；桑树坪镇耕地面积最少，自镇域西角向北角连接成线。

2009—2018年研究区耕地数量净减少1.55 km^2，减少耕地具有区域性（图2b）。东部生活平原区耕地减少最显著，约1.22 km^2，占总减少耕地的78.71%；其次是中部丘陵产业区，减少耕地为0.34 km^2，面积占比为21.94%。减少耕地在龙门镇中部、新城与西庄镇交界处、金城东部和芝川镇东部形成四点辐射中心，向周边小范围扩散，呈散点状。耕地减少的4个核心点在空间上可连成与黄河流域平行的直线，且与沿岸耕地带距离较远。该区域位于

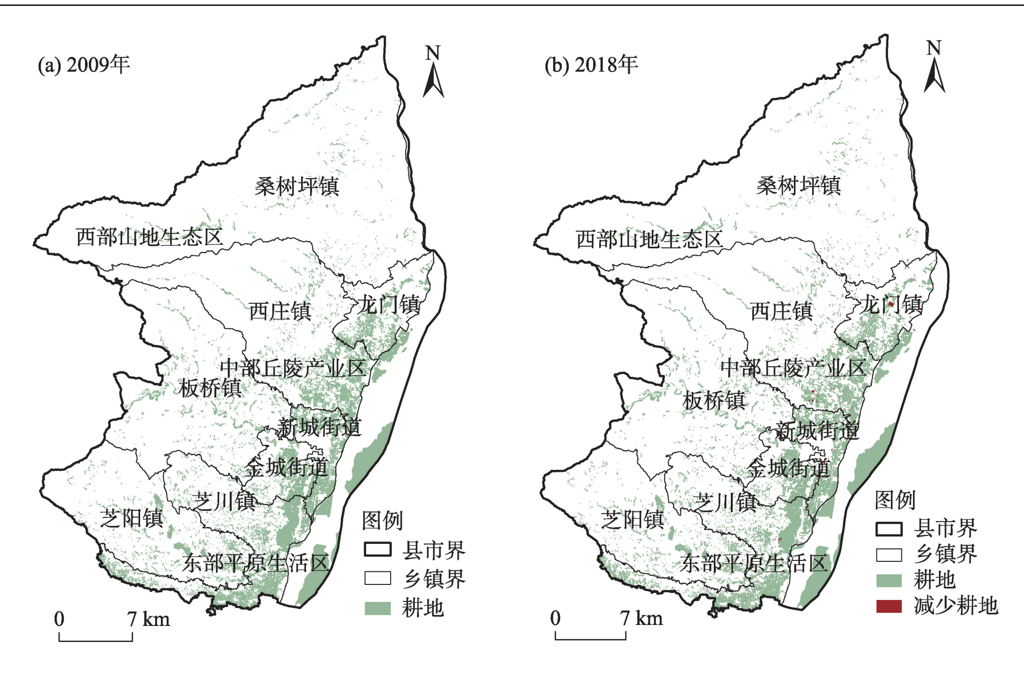


图2 韩城市耕地空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of cultivated land in Hancheng City

研究区中心城区,城镇化进程快,政策影响程度大,耕地主要转为建设用地、交通运输用地与园地,用于特殊年份的灾后重建、政策指导下的公共基础建设、产业引导的旅游文化投资与农业产业结构调整。西部山地生态区与中部丘陵产业区耕地减少不明显,零星耕地调整为其他用地,主要转为园地,用以发展花椒等经济作物。全域耕地数量较少,主要集中分布在东部平原,城镇建设重点区与开发区耕地减少程度最大,全域耕地数量西北少东南多、分布重心以东部平原为主且基本不变,与产业发展程度、城镇化水平具有一定的耦合关系。

2.2 耕地质量时空变化特征

根据《GB/T 33469-2016 耕地质量等级》中对研究区耕地质量评价的相关标准,对2009年和2018年耕地质量进行综合评价,评价得分见表2,按照耕地质量等级从高到低,分别划分1~10级(图3)。从得分情况来看,研究区整体平均得分小幅度提升,从2009年的0.795上升至2018年的0.800。10 a间各维度指标平均得分变化不大,整体呈小幅度增加,其中土壤养分状况和农田基础设施平均得分增加相对较多。从各维度指标得分来看,研究区耕地土壤健康状况和耕层理化性状较好,得分均接近0.900(满分为1),其中有效土层厚度与障碍因素平均得分分别为0.976与0.965,且生物多样性良好、耕地清洁程度高,说明耕地能维持粮食生产可持续的能力较高;立地条件和土壤剖面性状良好,其中土壤容重和质地构型平均得分为0.918、0.860,说明可供作物利用的土体条件优良,pH平均得分为0.683,土壤酸碱度需要进一步改善;土壤养分状况平均得分小于0.800,说明研究区土壤养分能基本满足作物生长,其中有机质与速效钾含量较高,适宜作物生长,有效磷得分较低,需进一步改善;农田基础设施平均得分为0.637,能基本满足农田灌溉与排水。

研究区分布1~9级耕地,没有10级地,研究期内平均耕地质量等级上升了0.126级。为便于分析,本文将1~9级分别划分成高等地(1~3级)、中等

表2 指标与区域整体平均得分

Tab. 2 Index and the overall average score of the region

年份	一级指标平均得分						评价得分	质量等级
	立地条件	土壤剖面性状	耕层理化性状	土壤养分状况	土壤健康状况	农田基础设施		
2009	0.843	0.826	0.892	0.771	0.917	0.626	0.795	4.266
2018	0.853	0.825	0.898	0.790	0.917	0.637	0.800	4.140

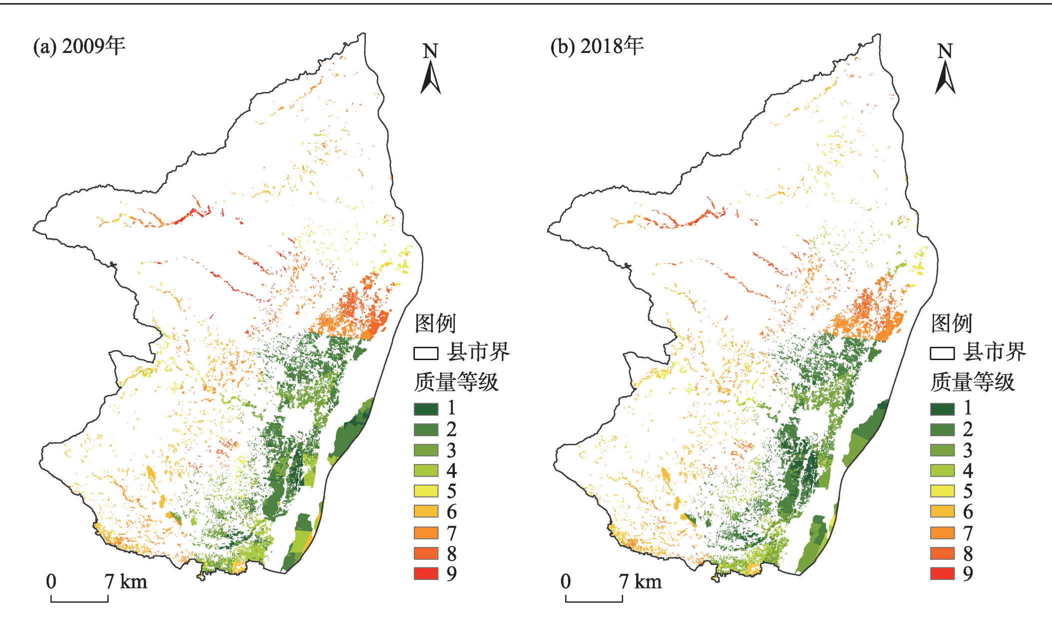


图3 韩城市耕地质量评价结果

Fig. 3 Evaluation results of cultivated land quality in Hancheng City

地(4~6级)、低等地(7~9级)。利用耕地质量转移矩阵,分析研究区各个等级耕地面积在研究期内的变化情况;利用耕地质量等级区位指数模型分析研究区各个等级耕地的分布情况。

2.2.1 耕地质量面积变化分析 10 a间研究区各等级耕地面积变化与等级间转移情况如表3所示。从各等级耕地总面积来看,各等级耕地面积相差较大且呈两极变化,即高多低少。其中,质量较高的2级地面积最大,其研究期初末耕地面积分别为42.66 km^2 与 46.82 km^2,约占总耕地面积的33.13%与36.36%;其次是3级地,研究期初末耕地面积依次为33.86 km^2 与 22.40 km^2,面积占比均介于15%~30%之间;质量较低的6、7级地研究期初末耕地面积分别为10.95 km^2 与 9.87 km^2、13.29 km^2 与 11.49 km^2,占比都接近10%;质量最高的1级地、质量中等的4~5级地与质量差的8级地面积较少且相差不大,面积占比均介于4%~7%;质量最差的9级地耕地面积最少,占比小于1%。

从各等级耕地转移情况来看,研究期内各等级耕地均发生转移且转移方向与耕地质量等级一致,以高转高,中转中、高,低转低、中为主要方向:1级地向2、3级地转出耕地面积约为3.12 km^2,2~4级地向1级地转入5.31 km^2,1级地面积增加2.19 km^2;2级地主要向1~4级地转出,1~5级地向2级地转入且

表3 质量等级转移矩阵

Tab. 3 Quality grade transfer matrix

/km^2

耕地质量等级		2018年									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	总计
2009年	1	3.00	2.92	0.20							6.12
	2	2.74	32.20	11.61	0.28						46.82
	3	2.43	5.47	13.00	1.34	0.16					22.40
	4	0.14	2.06	8.79	3.94	1.16	0.27	0.03			16.39
	5		0.02	0.27	1.57	2.02	1.20	0.29			5.37
	6			0.01	1.08	1.43	6.87	0.41	0.05	0.02	9.87
	7				0.01	0.60	2.42	7.19	1.22	0.05	11.49
	8						0.19	5.29	2.85	0.04	8.38
	9						0.00	0.07	1.51	0.35	1.94
	总计	8.31	42.66	33.86	8.22	5.37	10.95	13.29	5.64	0.46	128.77

小于转出，2级地面积减少4.16 km²；3级地主要向1、2级地转出，2、4级地为转入方向且转入大于转出，耕地面积增加最多，约为11.46 km²；4级地主要向3级地转出，2~6级地为主要转入方向且小于转出数量，耕地面积减少8.17 km²；5、6、7级耕地主要转出方向为4~6级，转入方向为5~8级且转移数量较小，耕地面积均小幅度增加；8、9级耕地主要转为7、8级地，耕地面积共减少4.22 km²。因此，结合图4b，10 a间研究区耕地质量面积变化主要以中等地向高等地转移为主。

2.2.2 耕地质量的区位分析 从图4耕地质量变化空间分布可以看出，研究区耕地以高等地为主，面积占比约为66%，集中分布在研究区东部的黄河沿岸与黄土台塬区；中等地次之，约占总耕地面积的19%，主要分布于黄河南岸、黄土台塬区南部及丘陵沟壑区的西南方向，黄河南岸与黄土台塬区耕地较为集中，丘陵沟壑区耕地沿水系呈弯曲条状；低等地面积占比为15%，集中分布在研究区以北，在黄土台塬区北部大片集中，沿河流向丘陵沟壑区西部延伸，破碎度高、密集程度大。整体以黄土台塬区、黄河沿岸耕地为主，自上而下形成低等地-高等地-中等地的耕地质量带。

利用耕地质量等级区位指数模型计算得到2009—2018年研究区各等级在镇域的区位指数，指数越大，等级在该镇聚集程度越高。从表4可以看出，高等地在东部与黄河相邻镇办聚集程度较高，其中金城街道区位指数最高，中等地在研究区黄河南岸与北部的桑树坪镇聚集程度高，东北部的龙门镇与北部的桑树坪镇低等地聚集程度较高。耕地质量等级区位指数结果与图4各等耕地空间分布情况相符，可进一步分析研究期变化。从高聚集镇域的研究期初末来看：对于高等地的高聚集镇域，1、2级地的区位指数在金城街道最高，数值从2009年的0.99与8.05转为4.61与6.93，3级地在新城街道的区位指数相对较高，指数小幅度上升；对于中等地的高聚集镇域，4级地主要聚集在桑树坪镇，区位指数相对较小，5级地在黄河沿岸与桑树坪镇聚集程度较高，区位指数一升一降，数值变化幅度较小，6级地主要聚集在黄河沿岸与桑树坪镇，区位指数较大且数值上升明显；对于低等地的高聚集镇域，7级地在龙门镇的聚集程度最高，区位指数从4.06上升至8.58，8级地在龙门镇与桑树坪镇的聚集程度相对较高，区位指数高且数值变动幅度大，9级地在全区分布少，区位指数最高镇为桑树坪镇，数值由5.12下

表4 韩城市各乡镇耕地质量等级区位指数

Tab. 4 Regional index of cultivated land quality grade in each town of Hancheng City

耕地质量等级	年份	镇域								
		黄河沿岸	板桥镇	金城街道	龙门镇	桑树坪镇	西庄镇	新城街道	芝川镇	芝阳镇
1	2009	0.00	0.24	0.99	0.00	0.00	0.09	1.23	0.15	0.97
	2018	0.00	0.10	4.61	0.00	0.00	0.04	1.51	0.28	0.49
2	2009	0.26	1.86	8.05	0.01	0.00	4.45	2.61	1.79	1.00
	2018	0.27	1.39	6.93	0.01	0.00	4.57	1.66	1.65	4.89
3	2009	1.09	0.39	3.12	0.00	0.00	0.81	4.96	0.96	4.38
	2018	1.25	1.69	1.26	0.00	0.00	0.72	6.13	1.20	1.60
4	2009	2.34	0.83	0.36	0.01	1.80	0.06	0.81	1.12	0.93
	2018	0.99	0.19	0.26	1.05	3.25	0.03	0.20	0.85	0.11
5	2009	3.84	0.03	0.25	2.31	4.97	0.04	0.01	0.19	0.45
	2018	5.48	0.10	0.00	1.58	2.23	0.01	0.00	0.18	0.40
6	2009	5.30	0.16	0.00	0.27	3.98	0.05	0.00	0.52	5.33
	2018	7.21	0.01	0.00	0.00	8.68	0.04	0.00	0.54	6.91
7	2009	5.02	0.12	0.00	4.06	8.97	1.11	0.00	0.17	2.37
	2018	2.66	0.38	0.00	8.58	1.39	1.13	0.00	0.17	0.95
8	2009	0.55	0.27	0.00	8.62	2.33	0.18	0.00	0.05	0.11
	2018	0.40	0.01	0.00	4.35	9.67	0.51	0.00	0.04	0.00
9	2009	0.07	0.00	0.00	0.02	5.12	0.40	0.00	0.00	0.00
	2018	0.00	0.00	0.00	0.00	1.63	0.07	0.00	0.00	0.00

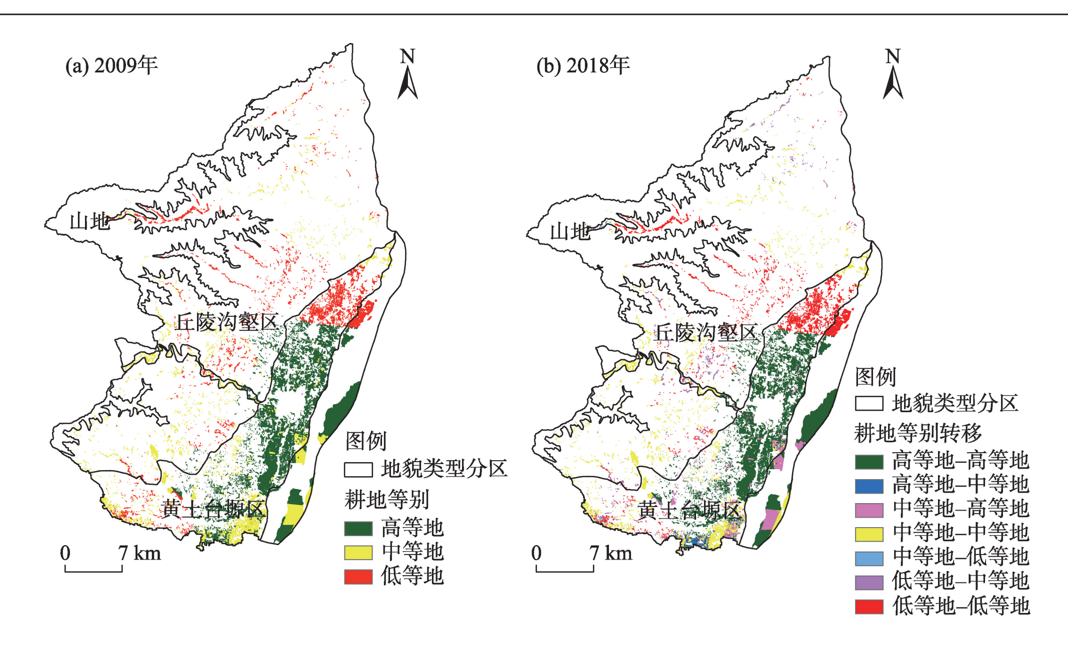


图4 2009—2018韩城市耕地质量变化空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of cultivated land quality change in Hancheng City from 2009 to 2018

降为1.63。

综上所述，研究区耕地质量时空变化呈整体耕地质量面积变化明显、等级间耕地面积差异较大和质量分布具有明显区域性等特征。各等级耕地面积变化明显，说明研究期内各等级耕地在数量基本不变的前提下，等级间转化较大，即各项评价指标具体分值发生变化。各项指标得分取决于采样点各项指标测算数值、空间插值运算与具体计算方法，研究期初末两期评价结果采用统一空间运算与计算模型，则指标得分差异主要源于指标原始数值，表明10 a间研究区基础性指标与区域性补充指标发生明显变化。而地形部位、海拔高度、生物多样性与地下水埋深等相对固定的评价因子需要长期自然力作用或人为改变，中短期内变化不明显；土壤养分状况及农田基础设施等直接与农田耕作相关的评价因子受耕地保护政策及农民耕地养护意识影响，情况逐渐转好，在研究期内得到小幅度提升，成为主要因素。各等级分布的耕地面积差异较大，主要由耕地数量的空间分布特征与各等级划分标准共同决定的，如耕地面积最大的2级地，综合指标得分介于区域耕地质量等级划分标准的2级地区间，且该区间的耕地主要位于研究区的耕地集中区，因此耕地面积远远大于其他等级。耕地质量区域性显著，说明研究区各级耕地空间分布具有一定规律，这主要是因为区域间的评价指标具有差异性与连续性。分等级来看，质量高的1~3级耕地分布区域地势平坦，灌溉条件好，农田基础设施配套且土壤理化性质较好，是研究区粮食生产核心区与永久基本农田保护区；质量适中的4~6级耕地分布于台塬区南部，该区域坡度较高，灌排能力基本满足，存在轻度盐渍化程度与障碍因素；质量较低的7~8级耕地分布区域主要位于台塬区北部、丘陵与山区，地势陡，灌溉条件差，无法满足农作物的基本种植条件。

2.3 耕地变化对粮食生产影响

粮食生产主要受气候变化的自然因素与水资源变化、土地利用结构、农业科技等社会因素影响，气候变化适用于大尺度、长时期的区域研究，对研究区10 a间的粮食生产变化影响不明显，此处耕地数量、排灌能力与农业科学技术等社会因素对研究区粮食生产起决定性作用。研究区粮食播种面积变化是粮食产量变化的主要影响因素：采用面积加权法计算单位粮播面积粮食产量，2009年研究区粮播面积为132.58 km^2，粮食产量为599.59 $t\cdot km^{-2}$，2018年粮播面积为84.51 km^2，单产为574.33 $t\cdot km^{-2}$，减少耕地单位面积粮食产量约为644 $t\cdot km^{-2}$，这是因为研究区内大量耕地进行花椒和苹果种植，导致粮食播种面积大幅度减少，粮食产量下降。耕地质量是影响粮食生产区位的主要因素：研究区主要粮食作物包括小麦和玉米，按成熟年制分为一年两熟小

麦、玉米与一年一熟春玉米,对韩城市高质量耕地重心分布区与以小麦、玉米为主的粮食生产核心区进行叠加分析发现,两者具有高重合度,即粮食作物主要分布在高质量耕地区域(图5a)。其中,小麦、夏玉米轮作一年两熟区主要在研究区东部平原区的新城、金城街道与黄河东岸,是研究区建设万亩粮食生产核心区,作为高标准农田建设主要区域,耕地质量得到提升;春玉米种植区主要分布桑树坪镇西部,在全区种植较少。

从研究期内分布重心迁移来看,小麦、玉米种植重心与高质量耕地分布重心具有同向迁移方向(图5b)。以各评价单元评价得分作为耕地质量分布重心的权数,对各评价单元的地理坐标进行加权得到高质量耕地分布重心的坐标;以小麦、玉米种植面积作为粮食生产区位重心的权数,加权计算得到主要粮食产区分布重心(表5)。从重心分布来看,耕地质量分布重心位于金城街道,该区域主要分布高等地,这是因为当评价得分作为权数时,分布重心偏移方向会指向评价得分高处;同样,粮食生产区位重心位于金城街道与新城街道交界处,主要粮食种植面积作为权数会使分布重心偏向粮食主要种植区域。从表中坐标与图上重心可以看出,研究期初末耕地质量与粮食生产区位分布重心变化不大,整体向东南方向迁移,两者方向一致。

综上所述,耕地数量、质量变化是研究区现阶段粮食产量、生产区位变化的主要成因。研究区小麦、玉米产量在气候条件与种源不变的前提下,主要受耕种面积与土壤结构、保水率与养分等质量指标影响,高质量耕地的土壤容重较低,土壤孔隙度高,蓄水能力强,在一定程度上可以提高小麦、玉米产量,这些区域成为小麦、玉米种植区。高质量耕地在空间上具有明显区域性,相同等级耕地成片聚

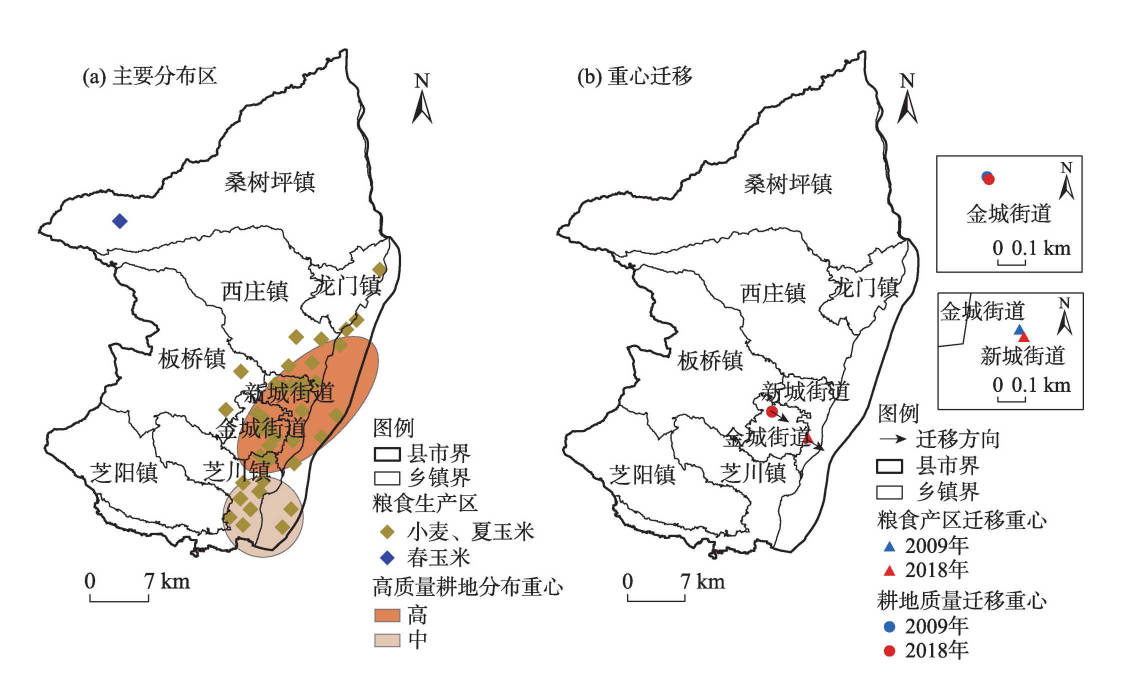


图5 韩城市耕地质量与粮食生产区

Fig. 5 Cultivated land quality distribution and grain production area in Hancheng City

表5 高质量耕地与粮食生产区位分布重心计算结果

Tab. 5 Calculation results of cultivated land quality and regional distribution center of grain production

年份	耕地质量		粮食生产	
	X/m	*Y*/m	*X*/m	*Y*/m
2009	718290.88	3929566.74	722691.40	3926598.69
2018	718342.42	3929554.52	722707.61	3926571.50
迁移	51.53	−12.22	16.21	−27.19

注:*X*、*Y*分别为分布重心加权后的横坐标、纵坐标。

集，粮食生产区位也随之聚集，形成与高质量耕地相同的空间格局与迁移趋势。

3 讨 论

粮食产量变化是由多种因素主导的，包括气候变化、耕地变化、种子选育、耕作方式和种植管理等。在基于气候变化及其他相关因素不变的前提下，研究区耕地数量变化不明显，因此重点探究了耕地质量变化对粮食产量、生产格局变化的影响。现有文献主要从数量方面探讨耕地利用强度、耕地压力指数等与粮食产量的耦合关系，通过空间格局与数量变化来表现；研究区域侧重于省级以上、主要粮食生产平原区及主要河流流域[35-37]。本文侧重从空间方面探讨耕地质量与粮食生产的关系，通过空间布局与迁移方向来表现，旨在耕地数量变化不明显、连续数据缺失的情况下，分析耕地质量等级变化、空间变化与粮食生产区位变化的关系；选择典型县域研究区，反映非粮食主产区的生态脆弱区域耕地与粮食安全情况。同时，在对研究期初末耕地质量评价时，可从各项评价指标中得到引起耕地变化的相关因素。从研究结果来看，研究区耕地质量评价得分增加而平均等级下降，这是因为在相关政策推动下，农民耕地保护意识提高，耕地种养结合，一定程度上提高了各指标得分，而由于城镇化、政策实施与产业调整，东部平原区高质量耕地局部减少，高等地比例下降，平均耕地质量等级降低。粮食生产则受耕地质量变化影响，主要粮食生产区位重心向高质量耕地分布重心偏移；而单位面积粮食产量降低显著，是耕地数量减少、耕地利用程度低与非粮经济作物快速发展共同作用的结果。

研究区在渭北旱塬区，属于粮食不安全级，当前处于快速城镇化、三产结构调整频繁与农业种植结构不断向经济作物倾斜阶段，挤占一定数量耕地是不可避免的。结合上述耕地资源利用特征与驱动因素，研究区应严格管控耕地用途转用，加强耕地保护，出台相关政策引导：(1) 在用地审批阶段增加效益评价，保障报批的土地在弥补被占用耕地减少的收益基础上，创造更多价值。(2) 针对耕地利用程度低的现状，应加强各个耕地利用分区的规划与监督，尤其是永久基本农田与高标准农田建设，遏制耕地非农化。(3) 优化农业生产结构，提高粮食作物种植比例。(4) 对基础质量较高、农田设施条件较好、无明显障碍因素的高等地，应加强耕地保育和利用，确保耕地质量稳中有升；对耕地立地条件一般、土壤性质与肥力状况较差的中低等地，开展农田基础设施建设，改良土壤，培育肥效。(5) 最后大力推进种养结合型的生态循环农业与增产农业推广技术，同时提升耕地质量水平与粮食生产能力。

4 结 论

(1) 10 a间，研究区耕地资源空间分布基本不变，集中分布在东部平原与黄河沿岸，形成“黄土台塬-黄河耕地带”；耕地数量自东向西北逐渐减少与分散，减少耕地主要分布在龙门镇中部、新城与西庄镇交界处、金城东部和芝川镇东部，位于研究区中心城区主要建设区域。

(2) 10 a间，研究区耕地质量变化明显，各等级面积差异较大，2级耕地面积占比最大；耕地质量在空间上自东部黄河沿岸向西北方向逐渐降低，自上而下形成低等地-高等地-中等地的耕地质量带；高等地集中分布于研究区东部平原区的金城街道、新城街道及黄河东岸，区位指数高；中等地在黄河南岸与桑树坪镇集中分布，区位聚集程度较高；低等地在龙门镇与桑树坪镇的区位指数相对较高。

(3) 耕地数量、质量变化是研究区粮食产量、生产区位变化的主要影响因素，10 a间耕地数量变化引起粮食净损失644 $t\cdot km^{-2}$；研究区中高质量耕地重心分布区与小麦、玉米生产核心区具有高重合度且迁移方向一致。

参考文献(References)

[1] 黄海潮, 温良友, 孔祥斌, 等. 中国耕地空间格局演化对耕地适宜性的影响及政策启[J]. 中国土地科学, 2021, 35(2): 61-70. [Huang Haichao, Wen Liangyou, Kong Xiangbin, et al. The impact of spatial pattern evolution of cultivated land on cultivated land suitability in China and its policy implication[J]. China Land Science, 2021, 35(2): 61-70.]

[2] 王风娇, 梁伟, 傅伯杰, 等. 近年来的黄土高原耕地时空变化与口粮安全耕地数量分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 161-171. [Wang Fengjiao, Liang Wei, Fu Bojie, et al. Spatial and temporal changes of cultivated land and quantitative analysis of ration safe cultivated land on the Loess Plateau in recent years[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 161-171.]

[3] 韩群柱, 冯起, 高海东, 等. 基于主成分分析的关中地区农业粮

食生产变化的影响因素研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 474-480. [Han Qunzhu, Feng Qi, Gao Haidong, et al. Influencing factors of agricultural production changes in Guanzhong based on PCA[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 474-480.]
[4] 刘正佳, 钟会民, 李裕瑞, 等. 近20年中国粮食生产变化特征及其对区域粮食供需格局的影响[J]. 自然资源学报, 2021, 36(6): 1413-1425. [Liu Zhengjia, Zhong Huimin, Li Yurui, et al. Change in grain production in China and its impacts on spatial supply and demand distributions in recent two decades[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(6): 1413-1425.]
[5] 金涛. 中国粮食生产时空变化及其耕地利用效应[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 912-919. [Jin Tao. Effects of cultivated land use on temporal-spatial variation of grain production in China[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(6): 912-919.]
[6] 张丽娟, 姚子艳. 20世纪80年代以来全球耕地变化的基本特征及空间格局[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1235-1247. [Zhang Lijuan, Yao Ziyan. Spatiotemporal characteristics and patterns of the global cultivated land since the 1980s[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(7): 1235-1247.]
[7] 刘纪远, 匡文慧. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14. [Liu Jiyuan, Kuang Wenhui. Spatiotemporal characteristics, and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 3-14.]
[8] 李亚丽, 杨粉莉, 杨联安, 等. 近40 a榆林市土地利用空间格局变化及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 1011-1021. [Li Yali, Yang Fenli, Yang Lian'an, et al. Spatial pattern changes and influencing factors of land use in Yulin City in the past 40 years[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 1011-1021.]
[9] 徐珊, 宋戈, 李丹, 等. 东北粮食主产区耕地资源时空变化及其对粮食生产能力的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 1-9. [Xu Shan, Song Ge, Li Dan, et al. Spatiotemporal change of cultivated land resources and its influence on grain production capacity in northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(21): 1-9.]
[10] 曾科军, 陈逸, 高中贵, 等. 长江三角洲土地利用变化与粮食安全分析[J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(6): 58-61. [Zeng Kejun, Chen Yi, Gao Zhonggui, et al. Study on the relationship of cultivated land change and food security in Yangtze River Delta[J]. Geography and Geo-Information Science, 2006, 22(6): 58-61.]
[11] 周小萍, 卢艳霞, 陈百明. 中国近期粮食生产与耕地资源变化的相关分析[J]. 北京师范大学学报(社会科学版), 2005(5): 122-127. [Zhou Xiaoping, Lu Yanxia, Chen Baiming. Correlation of grain production and cultivation land resources changes in recent China[J]. Journal of Beijing Normal University (Social Science), 2005(5): 122-127.]
[12] 陈百明, 周小萍. 中国近期耕地资源与粮食综合生产能力的变化态势[J]. 资源科学, 2004, 26(5): 38-45. [Chen Baiming, Zhou Xiaoping. Changes of agriculture resources and grain comprehensive productive capacity of China in recent years[J]. Resources Science, 2004, 26(5): 38-45.]
[13] 杨元智, 陈运春, 廖丽君, 等. 西南片区耕地等别空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 226-232, 393. [Yang Yuanzhi, Chen Yunchun, Liao Lijun, et al. Characteristics of spatial distribution of arable land grade in southwest China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 226-232, 393.]
[14] 杜国明, 刘彦随, 于凤荣, 等. 耕地质量观的演变与再认识[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 243-249. [Du Guoming, Liu Yansui, Yu Fengrong, et al. Evolution of concepts of cultivated land quality and recognition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(14): 243-249.]
[15] 张千五, 王数, 张凤荣, 等. 基于农用地分等的粮食生产能力田间质量限制研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 85-88. [Zhang Qianwu, Wang Shu, Zhang Fengrong, et al. Field quality limit to grain potential productivity based on farmland classification[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(10): 85-88.]
[16] 余振国, 胡小平. 我国粮食安全与耕地的数量和质量关系研究[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3): 45-49. [Yu Zhen'guo, Hu Xiaoping. Research on the relation of food security and cultivated land's quantity and quality in China[J]. Geography and Geo-Information Science, 2003, 19(3): 45-49.]
[17] 关兴良, 方创琳, 鲁莎莎. 中国耕地变化的空间格局与重心曲线动态分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(12): 1997-2006. [Guan Xingliang, Fang Chuanglin, Lu Shasha. Analysis of spatial distribution and gravity centers curve dynamic cultivated land changes in China[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(12): 1997-2006.]
[18] 潘佩佩, 杨桂山, 苏伟忠, 等. 1985年以来太湖流域耕地变化与粮食生产研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(10): 1289-1296. [Pan Peipei, Yang Guishan, Su Weizhong, et al. Study on cultivated land change and grain production in Taihu Lake Basin since 1985[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(10): 1289-1296.]
[19] 肖丽群, 陈伟, 吴群, 等. 未来10 a长江三角洲地区耕地数量变化对区域粮食产能的影响——基于耕地质量等别的视角[J]. 自然资源学报, 2012, 27(4): 565-576. [Xiao Liqun, Chen Wei, Wu Qun, et al. Impact of cultivated land quantity change on grain productive capacity of Yangtze River Delta in the next 10 years: From the perspective of cultivated land quality grade[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(4): 565-576.]
[20] 刘洛, 徐新良, 刘纪远, 等. 1990—2010年中国耕地变化对粮食生产潜力的影响[J]. 地理学报, 2014, 69(12): 1768-1776. [Liu Luo, Xu Xinliang, Liu Jiyuan, et al. Impact of farmland changes on production potential in China during recent two decades[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(12): 1768-1776.]
[21] 赵永华, 刘晓静, 奥勇. 陕西省耕地资源变化及耕地压力指数分析与预测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 217-223. [Zhao Yonghua, Liu Xiaojing, Ao Yong. Analysis and prediction of cultivat-

ed land resource change and cultivated land pressure index in Shaanxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(11): 217-223.]

[22] 杜自强, 荣荣, 程文仕, 等. 甘肃省粮食和耕地变化及其趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(10): 62-67. [Du Ziqiang, Rong Rong, Cheng Wenshi, et al. A primary analysis of cropland change and food security in Gansu Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(10): 62-67.]

[23] 杨慧, 赵永华, 王达, 等. 陕西省耕地等别空间特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 271-276. [Yang Hui, Zhao Yonghua, Wang Da, et al. Characteristics of spatial distribution of cultivated land grade in Shaanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3): 271-276.]

[24] 张志雷, 孔祥斌, 张青璞. 京津冀鲁地区耕地等别空间分布特征研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(增刊 1): 230-237. [Zhang Zhilei, Kong Xiangbin, Zhang Qingpu. Spatial distribution characteristics of arable land grade in Beijing-Tianjin-Hebei-Shandong Region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(Suppl. 1): 230-237.]

[25] 石淑芹, 陈佑启, 姚艳敏, 等. 东北地区耕地变化对粮食生产能力的影响评价[J]. 地理学报, 2008, 63(6): 574-586. [Shi Shuqin, Chen Youqi, Yao Yanmin, et al. Impact assessment of cultivated land change upon grain productive capacity in northeast China[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(6): 574-586.]

[26] Pablo B, Jose M S, Cesar F. Evaluating land administration system: A comparative method with an application to Peru and Honduras[J]. Land Use Policy, 2010, 27(2): 351-363.

[27] Herzog F, Steiner B, Bailey D, et al. Assessing the intensity of temperate European agriculture at the landscape scale[J]. European Journal of Agronomy, 2006, 24(2): 165-181.

[28] Dumanski J, Pieri C. Land quality indicators: Research plan[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2000(81): 93-102.

[29] 刘文超, 颜长珍, 秦元伟, 等. 近 20 a 陕北地区耕地变化及其对农田生产力的影响[J]. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1373-1382. [Liu Wenchao, Yan Changzhen, Qin Yuanwei, et al. Change of cultivated land and its impact on farmland productivity in northern Shaanxi during the past 20 years[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 1373-1382.]

[30] 李国凤, 宋戈. 黑龙江省宝泉岭垦区粮食生产动态分析与预测[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 223-227. [Li Guofeng, Song Ge. Grain production dynamic analysis and prediction of Baoquanling Reclamation in Heilongjiang Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(6): 223-227.]

[31] 杨苗, 杨萍果. 近 25 a 临汾市耕地资源与粮食安全动态分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 271-274. [Yang Miao, Yang Pingguo. Dynamic analysis of arable land resources and food security of Linfen City in recent 25 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(5): 271-274.]

[32] 李玉平, 蔡运龙. 浙江省耕地变化与粮食安全的分析及预测[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(4): 466-470. [Li Yuping, Cai Yunlong. Analysis and prediction of cropland change and grain security in Zhejiang Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(4): 466-470.]

[33] GB/T 33469-2016. 中华人民共和国国家标准: 耕地质量等级[S]. 北京: 高等教育出版社, 2016. [GB/T 33469-2016. National standard of the People's Republic of China: Quality grade of cultivated land[S]. Beijing: Higher Education Press, 2016.]

[34] 洪舒蔓, 郝晋珉, 周宁, 等. 黄淮海平原耕地变化及对粮食生产格局变化的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 268-275. [Hong Shuman, Hao Jinmin, Zhou Ning, et al. Change of cultivated land and its impact on grain production pattern in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 268-275.]

[35] 阴柯欣, 商庆凯, 米文宝. 宁夏耕地生产力与粮食安全耦合关系及趋势预测[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(7): 37-45. [Yin Kexin, Shang Qingkai, Mi Wenbao. Analysis and forecast of coupling relationship between cultivated land productivity and food security in Ningxia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(7): 37-45.]

[36] 麦丽开·艾麦提, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 叶尔羌河平原绿洲耕地利用转型与粮食产量耦合关系研究[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(10): 63-68. [Aimaiti Malikai, Shabiti Mansur, Zhang Xueqi. The coupling relationship between the transformation of cultivated land utilization and grain yield in Yarkant River Plain Oasis[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(10): 63-68.]

[37] 蒋敏, 李秀彬, 辛良杰, 等. 南方水稻复种指数变化对国家粮食产能的影响及其政策启示[J]. 地理学报, 2019, 74(1): 32-43. [Jiang Min, Li Xiubin, Xin Liangjie, et al. The impact of paddy rice multiple cropping index changes in southern China on national grain production capacity and its policy implications[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(1): 32-43.]

Temporal and spatial changes of cultivated land and its impact on grain production in Weibei dryland district of Shaanxi Province

LONG Xiaocui[1,2], LIU Jing[1,2], XU Zhongwei[1,2], WEI Fang[1,2]

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Northwest Key Laboratory of Plant Nutrition and Agricultural Environment, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: This paper investigates the temporal and spatial change of cultivated land quantity, evaluation of the cultivated land quality and its temporal and spatial changes, and impact of cultivated land change on food production in Hancheng City, Shaanxi Province, China. The scope of the cultivated land is extracted using the spatial analysis method, and the change in the cultivated land quantity in Hancheng City during the study period is analyzed. The comprehensive index of the cultivated land quality is calculated using the analytic hierarchy process and Delphi method. Then, the cultivated land quality grade is conducted to obtain the evaluation results of the cultivated land quality in Hancheng City. Based on the ArcGIS software and location index model of cultivated land quality grade, the temporal and spatial changes in cultivated land quality in Hancheng City in the past decade were obtained. Finally, through the transfer model of the distribution center of gravity, the distribution center of cultivated land quality and the distribution center of grain production location in Hancheng City are calculated, and the relationship between them is analyzed. The results are as follows. (1) In the past decade, the spatial distribution of cultivated land resources in the study area has been unchanged, concentrated in the eastern plains and along the Yellow River. The amount of cultivated land gradually decreases and disperses from east to northwest, and the reduced cultivated land is distributed in the main construction areas of the central urban area. (2) The cultivated land quality in the study area changed significantly, the area of each grade varied greatly, and the area of grade 2 cultivated land accounted for the largest proportion. In space, the cultivated land quality gradually decreases from the east along the Yellow River to the northwest, and a cultivated land quality belt of low land, high land, and medium land is formed from top to bottom. (3) Farming methods, non-grain, and cultivated land quality are the main factors influencing grain yield and production location in the study area. The center of the gravity distribution area of medium and high-quality cultivated land in the study area has a high degree of congruence with the core area of wheat and corn production, and the migration direction is the same. Exploring and analyzing the temporal and spatial variation characteristics of cultivated land quality and its impact on grain production is essential to solving the problems of regional cultivated land protection and non-grain. This paper selects a typical county research area to investigate the relationship between cultivated land quality and food production from the spatial aspect, which is expressed through the spatial layout and migration direction, to reflect the cultivated land and food security in ecologically fragile areas of non-food producing areas. It is essential to deeply understand the utilization characteristics of regional cultivated land resources, make rational use and efficient management of cultivated land resources, and ensure regional food security.

Key words: cultivated land quality evaluation; temporal and spatial change of cultivated land; food security; Weibei dryland district